

УДК 621.914

Ю.Н. Внуков, д-р техн. наук, С.И. Дядя, канд. техн. наук,
Е.Б. Козлова, Запорожье, Украина

О ВЛИЯНИИ КОНСТРУКТИВНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ НА ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ

У статті виконано аналіз конструктивних і геометричних параметрів кінцевих фрез, видів робіт, які виконуються кінцевими циліндричними фрезами. Проаналізовано вплив цих параметрів на вібростійкість процесу фрезерування.

Ключові слова: характеристики кінцевих фрез, фрезерування, вібрації

В статье выполнен анализ конструктивных и геометрических параметров концевых фрез, видов работ, выполняемых концевыми цилиндрическими фрезами. Проанализировано влияние этих параметров на виброустойчивость процесса фрезерования.

Ключевые слова: характеристики концевых фрез, фрезерование, вибрации

This article gives an analysis of the structural and geometric parameters of end mills, types of work performed by the cylindrical end mills. The effect of these parameters on the vibration milling process.

Keywords: parameters of end mills, milling process, vibration

Использование одного из древнейших инструментов, концевой фрезы, сегодня получило еще более широкое применение при внедрении в производство обрабатывающих центров с ЧПУ. С помощью концевых фрез можно выполнять самые различные виды работ по обработке не только плоских, но и сложных по форме поверхностей. Основные виды работ приведены на рис. 1.

Из рисунка видно, что у концевой фрезы всегда можно различить боковые режущие кромки на винтовых зубьях, торцевые режущие кромки и переходные радиусные режущие кромки для сферических и тороидальных концевых фрез. Последние виды концевых фрез используют при обработке сложных по форме поверхностей.

В большинстве случаев, главные режущие кромки зубьев фрезы, снимающие большую часть припуска, расположены на боковой цилиндрической поверхности фрезы и для разных условий обработки (черновая и чистовая) могут иметь различную форму (табл. 1). Зубья фрезы, расположенные на плоском торце могут иметь режущую кромку в центре, которая позволяет фрезе работать с врезанием под углом или параллельно оси в условиях плунжерного фрезерования.

В последние годы для авиационной, инструментальной и др. отраслей промышленности увеличиваются виды работ связанные с фрезерованием деталей, у которых есть элементы, представляющие собой тонкие стенки.

Рис. 1, б. Для этих деталей один размер, толщина стенки, намного меньше ее высоты и ширины. В связи с этим, при их фрезеровании особенно интенсивно возникают вибрации, ухудшающие точность и качество обработки и снижающие стойкость фрез. Выбор конструкции и геометрических параметров концевых фрез для окончательной и финишной обработки тонкостенных деталей является не простой технологической задачей, так как необходима фреза, обеспечивающая максимальную виброустойчивость процесса фрезерования.

Конструктивные и геометрические параметры концевых фрез должны соответствовать ГОСТу 17025-71, по которому фрезы изготавливают двух типов (рис. 2): фрезы с нормальным зубом, у которых угол спирали равен ($\omega = 30^\circ - 35^\circ$) и фрезы с крупным зубом, у которых ($\omega = 35^\circ - 45^\circ$). Фрезы с нормальным зубом могут иметь 3, 4, 5 и 6 зубьев и диаметр от 2 до 28 мм. Фрезы с крупным зубом 2, 3 и 4 зуба и диаметр от 2 до 12 мм.

Диаметр и количество зубьев фрезы оказывают существенное влияние на вибростойкость, из-за изменения характеристик их жесткости и времени контактирования с деталью. На рис. 3 показано сравнение площади стружечных канавок F_k и площади сердцевины фрезы в зависимости от числа зубьев. При одном диаметре фрезы D с увеличением числа зубьев увеличивается диаметр сердцевины – d , повышающий прочность и жесткость фрезы, но ухудшающий условия размещения стружки.

Следующей характеристикой каждого типа фрезы, является ее исполнение: с цилиндрической ленточкой на задней поверхности зуба ($f_a \leq 0,05$ мм) или зуба заточенного наостро. Наличие ленточки и величина радиуса округления режущей кромки существенным образом оказывает влияние на виброустойчивость при работе в диапазоне возникновения регенеративных автоколебаний. Причем для $d \geq 8$ мм, рис. 4, зуб должен быть затылован и иметь ленточку, а для $d < 8$ мм заточку зуба производят по плоскости в двух исполнениях (с ленточкой и наостро).

При введении ГОСТ 17025-71 (01.01.73 г.) фрезы должны были изготавливать с неравномерным окружным шагом, показанном на рис. 5 и табл. 2 с целью повышения их вибростабильности. Допускалось изготовление фрез с равномерным окружным шагом – ф. Однако, через 18 лет изменением №5 ГОСТа 17025-71 (дата введения с 01.09.91 г.) обязательные условия по изготовлению фрез с неравномерным шагом были переведены в рекомендуемые. Эти изменения показывают, что процесс подавления вибраций является не достаточно изученным явлением и одним изменением окружного шага фрезы не всегда можно получить положительный результат.

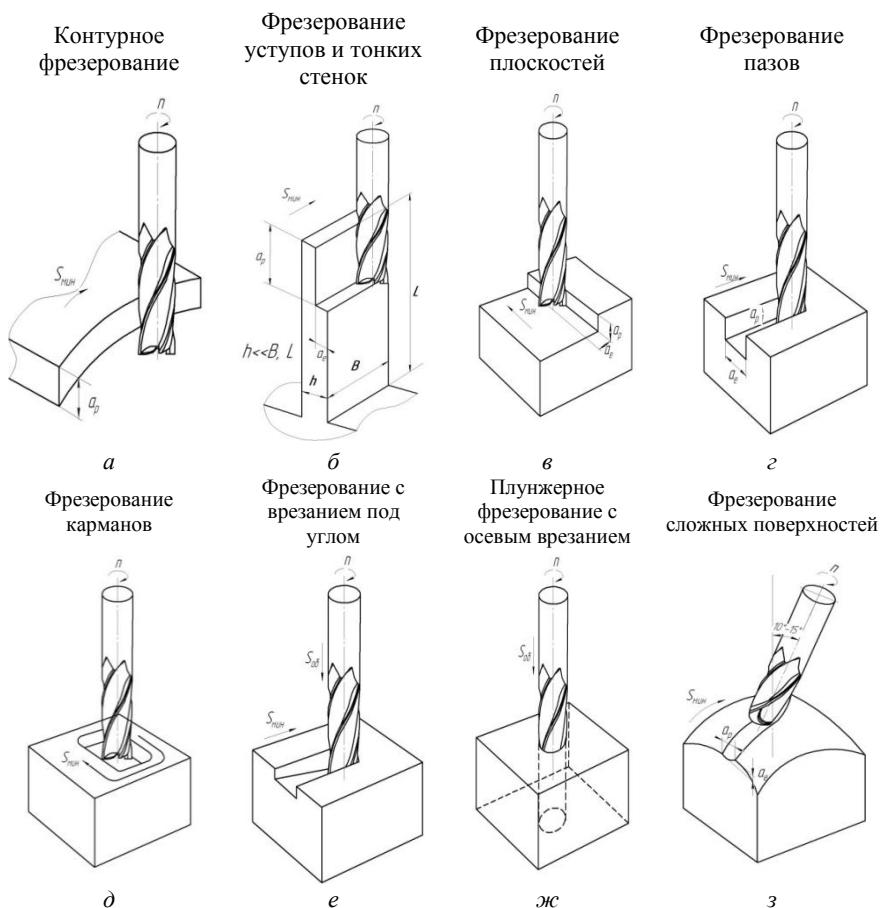
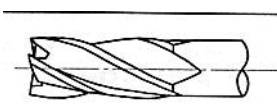
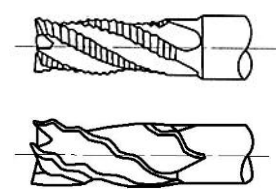


Рисунок 1 – Виды работ, выполняемые концевыми цилиндрическими фрезами

В работе [1] приведены результаты исследований по подавлению вибраций в результате незначительных изменений ($\Delta\omega \leq 4^\circ$) углов наклона ω соседних зубьев цилиндрической фрезы. На рис. 6 показано, что различие в углах наклона соседних зубьев на 2° увеличивает ширину безвибрационного фрезерования в 2 раза, а на 4° в 3,5 раза. Дальнейшее увеличение разницы в углах наклона $\Delta\omega$ соседних зубьев оказывает незначительное повышение вибростойкости. Аналогичные исследования были выполнены на Украине (г. Мариуполь) А.С. Крепаком [2, 3, 4] (1972 г.) и др. в которых рассматривали процесс резания жаропрочных сталей концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями. На основании этих исследований в СССР были

разработаны отраслевые стандарты ОСТ 1.52760-85, ОСТ 1.52761-85 «Фрезы концевые с чередующимися разнонаклонными режущими зубьями» (введенные с 01.01.87 г.). ОСТы определяли конструкции, размеры и технологические требования для концевых фрез из быстрорежущих сталей для обработки жаропрочных и титановых сплавов. Рис. 7.

Таблица 1 – Виды режущих кромок у концевой цилиндрической фрезы

Тип	Форма	Условия применения
Обычный зуб на цилиндрической поверхности		Фрезы с неизменяющейся геометрией зуба, наиболее широко используются при черновом и чистовом фрезеровании контуров, обработке пазов и уступов
Зуб для черновой обработки		У фрез чернового типа режущая кромка имеет зубчатую форму или волнистую, что позволяет дробить стружку на мелкие части. Низкое сопротивление резанию позволяет применять высокие подачи при черновой обработке. Переточку производят по передней поверхности зуба.

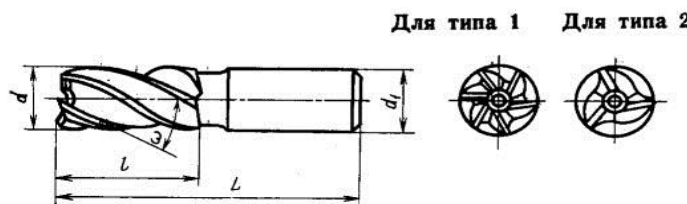


Рисунок 2 – Основные типы концевых фрез ГОСТ 17025-71

Тип 1 – фрезы с нормальным зубом ($\omega = 30-35^\circ$);

Тип 2 – фрезы с крупным зубом ($\omega = 35-45^\circ$)

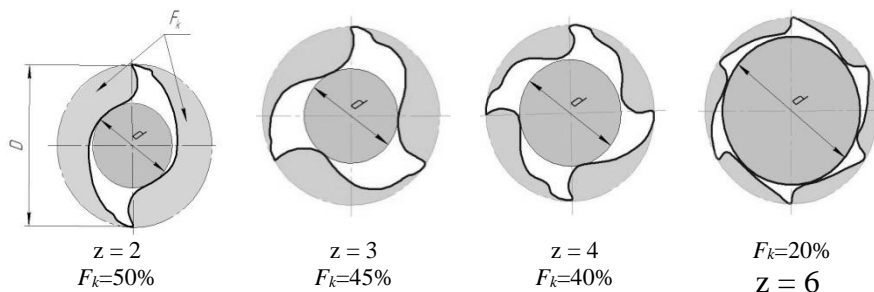


Рисунок 3 – Сравнение площади поперечного сечения стружечных канавок F_k и диаметра сердцевины фрезы – d от количества зубьев – z

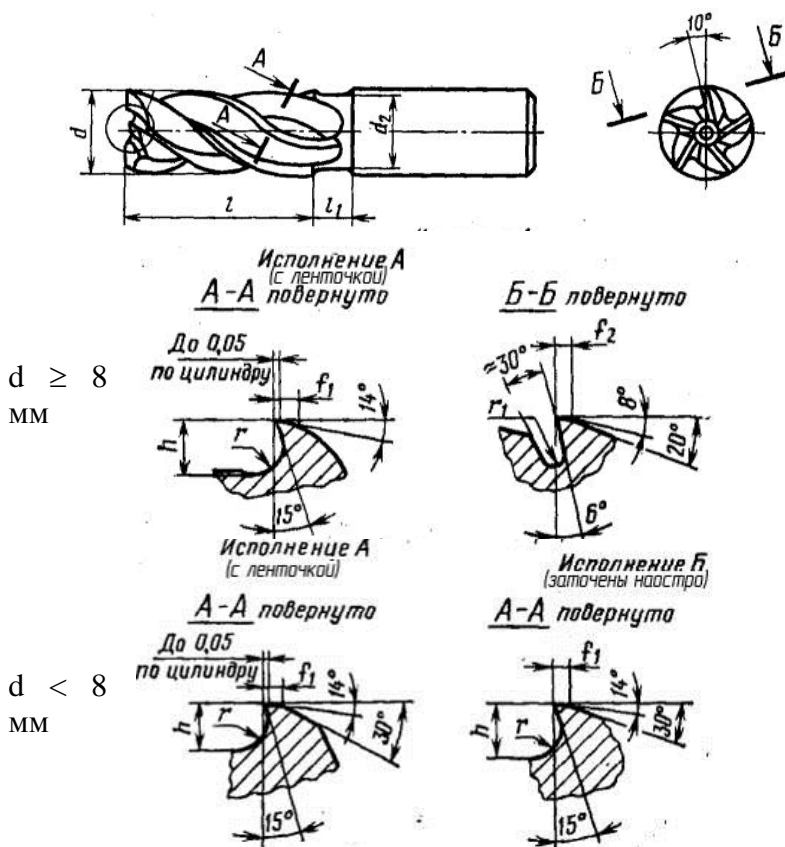


Рисунок 4 – Основные размеры и исполнение фрез по ГОСТ 17025-71

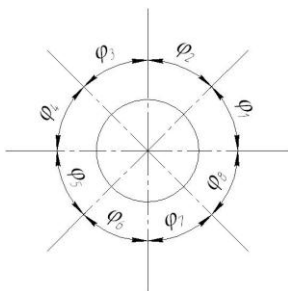


Рисунок 5 – Окружной шаг многозубой фрезы (ГОСТ 17025-71, ГОСТ 18371-71)

Таблица 2 – Значения окружного шага по ГОСТ 17025-71, ГОСТ 18371-71

Число зубьев	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6
3	110°	123°	127°	—	—	—
4	90°	85°	90°	95°	—	—
5	68°	72°	76°	68°	76°	—
6	57°	63°	57°	63°	57°	63°

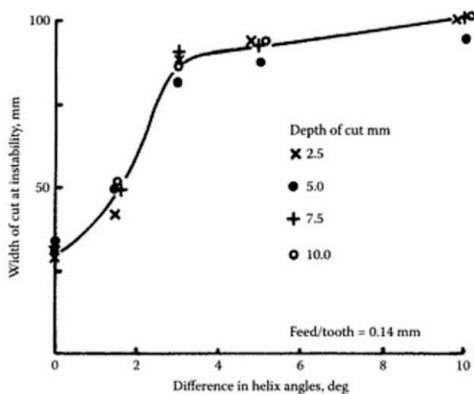


Рисунок 6 – Зависимость виброустойчивости цилиндрических фрез от различия в углах наклона режущих кромок у соседних зубьев [1]

Фрезы изготавливали двух типов:

- 1 – Фрезы с крупным зубом, $z = 4$ ($\omega_1 = 38^\circ 8'$ и $\omega_2 = 36^\circ 12'$), $d = 10 - 25$ мм.
- 2 – Фрезы с нормальным зубом, $z = 6$ ($\omega_1 = 38^\circ 8'$ и $\omega_2 = 34^\circ 54'$), $d = 10 - 25$ мм.

В поперечном сечении на $\frac{1}{2}$ длины рабочей части фрезы окружной шаг φ для всех зубьев одинаков.

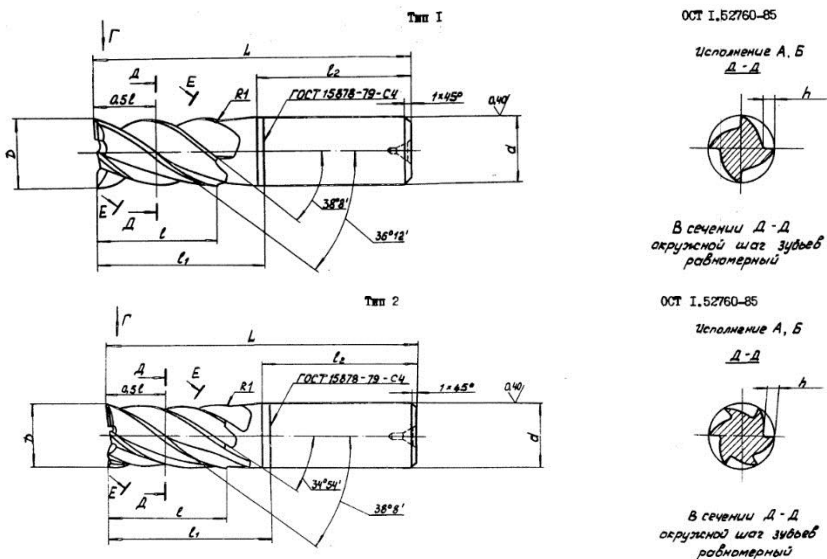
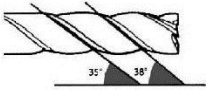
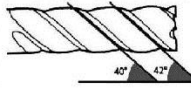
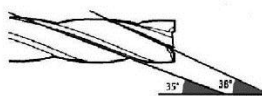
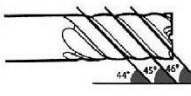


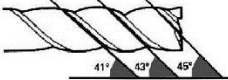
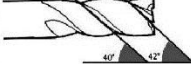


Рисунок 7 – Фрезы концевые с чередующимися разнонаклонными режущими зубьями (ОСТ 1.52760-85, ОСТ 1.52761-85)

Значительное улучшение в последнее десятилетие качества современных твердых сплавов с ультрамелкозернистыми карбидами и технологией их алмазно-абразивной обработки позволило производить цельные вышлифованные концевые фрезы из твердых сплавов. Применение в качестве инструментального материала твердых сплавов позволяет значительно увеличить скорости обработки (частоту вращения шпинделя). С точки зрения динамики резания увеличение частоты вращения фрезы существенно изменяет частоты воздействия вынуждающих сил, приводящих к изменению условий возбуждения колебательных процессов при обработке. Ряд современных зарубежных инструментальных фирм предлагают рынку широкий выбор концевых фрез из твердых сплавов, у которых основным достоинством рекламируется их высокая виброустойчивость в результате перехода от изготовления равнонаклонных винтовых зубьев к разнонаклонным.

Фирма GUHRING [5] (табл. 3) и ряд других зарубежных фирм (табл. 4) предлагают различное сочетание углов наклона зубьев концевых фрез ω от 35° до 45° с разницей в углах наклона у соседних зубьев $\Delta\omega = 2 - 4^\circ$.

Таблица 3 – Концевые фрезы с разнонаклонными стружечными канавками – ω и рекомендуемые области их применения. Фирма GUHRING [5]

<p>RF 100 U (Тип N)</p> 	<p>Спираль 35°/38°. Обработка канавок, черновая и чистовая обработка стали, высоколегированной и закаленной стали: - предел прочности на разрыв 1600 Н/мм² - твердость 48 HRC</p> <p>$\Delta\omega=3^\circ$</p>	<p>RF 100F (Тип NH)</p> 	<p>Спираль 40°/42°. Обработка канавок, черновая и чистовая обработка мягких и вязких сталей, а также прочих длинностружечных материалов: - предел прочности на разрыв 850 Н/мм²; - твердость 25 HRC.</p> <p>$\Delta\omega=2^\circ$</p>
<p>RF 100 Ti (Тип N)</p> 	<p>Спираль 35°/38° с угловым радиусом. Обработка канавок, черновая обработка титановых сплавов.</p> <p>$\Delta\omega=3^\circ$</p>	<p>RF 100 SF (Тип NH)</p> 	<p>Спираль 44°/45°/46°. Чистовая обработка HSC. Получерновая обработка с шириной до 0,3D и черновой обработки HRC по всей длине режущей кромки стандартной стали, чугуна, цветных металлов и высоколегированных материалов.</p> <p>$\Delta\omega=1-2^\circ$</p>
<p>RF 100 VA (Тип N)</p> 	<p>Спираль 36°/38°. Обработка канавок, черновая и чистовая обработка нержавеющих материалов.</p> <p>$\Delta\omega=2^\circ$</p>	<p>RF 100 A (Тип W)</p> 	<p>Спираль 40°/42°. Обработка канавок, черновая и чистовая обработка алюминия, алюминиевых сплавов, длинностружечных материалов и цветных металлов.</p> <p>$\Delta\omega=2^\circ$</p>
<p>RF 100U (Тип N) 3 лезвия</p> 	<p>Спираль 41°/43°/45°. Обработка канавок, черновая и чистовая обработка высоколегированных и закаленных сталей: - предел прочности на разрыв 1400 Н/мм² - твердость 44 HRC В 3 лезвийном исполнении для сверхбольших глубин резания.</p> <p>$\Delta\omega=2-4^\circ$</p>	<p>RF 100 H (Тип II)</p> 	<p>Спираль 40°/42° и увеличенной сердцевиной. Черновая обработка до 1xD в материалах твердостью до 54 HRC, для чистовой обработки по всей длине режущей кромки в материалах твердостью до 60 HRC. Пригодна для черновой обработки материалов твердостью более 60HRC.</p> <p>$\Delta\omega=2^\circ$</p>

Однако во всех рекламных материалах по применению предлагаемых конструкций фрез отсутствуют рекомендации о скоростном диапазоне их эффективного применения. При увеличении применения в промышленном производстве фрезерных станков со скоростным шпинделем, позволяющим получать числа оборотов значительно выше, чем на традиционных станках в широком диапазоне (более 2000 об/мин), эффективность предлагаемых конструкций фрез является не доказанной.

Основанием для такого утверждения являются результаты исследований природы возбуждения колебательного процесса при концевом фрезеровании

тонкостенных деталей, выполняемые в Запорожском национальном техническом университете. [6, 7] В этих работах показано, что с увеличением скорости вращения концевой цилиндрической фрезы существуют скоростные зоны, в которых наблюдаются различные механизмы возбуждения колебаний, (рис. 8).

При низких скоростях наблюдаются только вынужденные колебания детали. При дальнейшем увеличении скорости на вынужденные колебания могут накладываться регенеративные автоколебания. При финишном скоростном фрезеровании, когда назначают незначительные осевые и радиальные глубины фрезерования автоколебания вырождаются и наблюдаются только вынужденные колебания. Более того, при концевом фрезеровании могут появляться еще и свободные колебания детали во время холостого хода между резанием соседними зубьями фрезы. Такие различия в условиях возбуждения вибраций требует экспериментального подтверждения того, что именно разнонаклонность режущих зубьев позволяет эффективно бороться с различными видами вибраций в широком скоростном диапазоне. Другими словами, широко рекламируемые концевые фрезы с разнонаклонными стружечными канавками, изготовленные из современных твердых сплавов, позволяют вести обработку с увеличенными скоростями вращения шпинделя, при которых они могут выходить из скоростного диапазона возбуждения автоколебаний. В этих условиях любая несимметричность конструкции фрезы может значительно ухудшить ее вибростойкость.

Таблица 4 – Анализ современных каталогов изготовителей концевых фрез с разнонаклонными спиральными зубьями

№ п/п	Производитель фрез	Число зубьев, z	Угол наклона режущей кромки, ϕ_1, ϕ_2	Обрабатываемый материал	Примечания, $\Delta\phi$
1	ООО "Инстроника", Россия	4	35/38	Сталь, чугун, цветные сплавы	③
		3	33/35/37	Сталь, чугун, цветные, титановые, жаропрочные сплавы	2
		4	41/44	Нержавеющая сталь, цветные, титановые, жаропрочные сплавы	③
2	ООО "Техтрейд", Россия	4	35/38	Материалы выше 60 HRC	3
3	Maykestag, Австрия	3	34/36	Труднообрабатываемые материалы, титановые сплавы выше 50 HRC	2
		4	35/38		3
		4	39/42		3
4	MITSUBISHI, Япония	4	37/40	Сталь, чугун, цветные, титановые, жаропрочные сплавы	③
5	ARNO, Германия	4	35/38	Сталь, чугун, цветные сплавы	3
		4	26/30		④
		5	35/38		3
6	PARA Tooling, Европа	4	35/38	Сталь, чугун, цветные сплавы	③

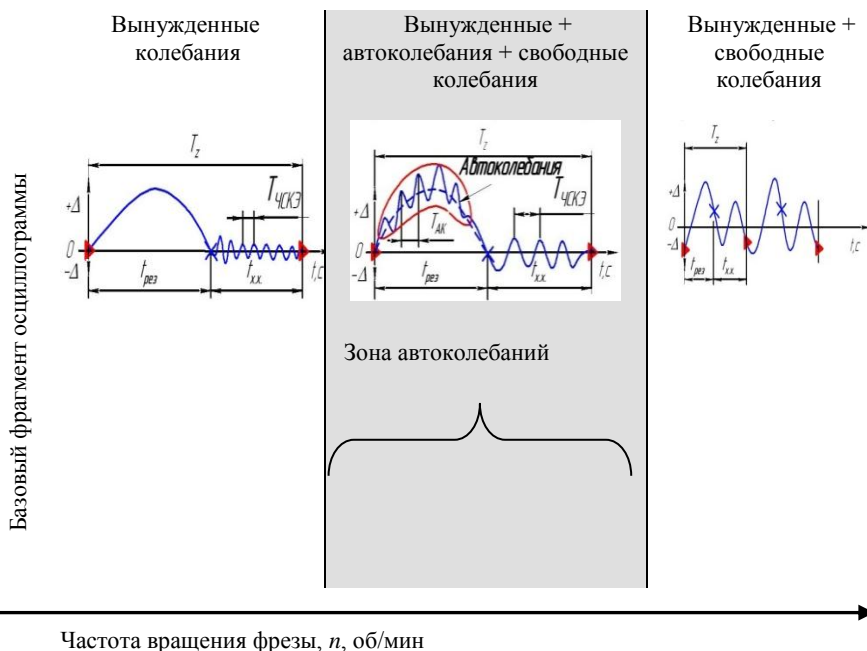


Рисунок 8 – Виды колебаний детали с тонкими стенками при концевом фрезеровании в широком диапазоне частот вращения фрезы

Анализ табл. 3 и 4 показывает, что рекомендации фирм изготовителей твердосплавных концевых фрез с разнонаклонными режущими зубьями, по областям их эффективного применения, не отражают особенностей черновой и чистовой обработки, а также различия в свойствах обрабатываемых материалов. Одну геометрию фрезы рекомендуют при обработке стали, чугуна, цветных сплавов, титановых и жаропрочных сплавов. Скоростные режимы, применяемые при обработке этих материалов в условиях чернового и чистового фрезерования, очень отличаются из-за различной скорости фрез. Поэтому в каждом рекомендуемом случае оптимальная скорость резания будет различной. Для концевой фрезы это означает, что ее частота вращения также будет различной.

Изменение частоты вращения и количества режущих зубьев непосредственно влияет на частоту приложения вынуждающих колебаний силы резания. Поэтому в зависимости от сочетания «зубцовый» частоты силового воздействия со стороны фрезы и собственных частот колебания обрабатываемой детали могут наблюдаться совершенно разные механизмы возбуждения вибраций. В одних случаях при появлении регенеративных автоколебаний, которые накладываются на вынужденные, конструкции фрез

с разнонаклонными зубьями могут быть очень эффективными для повышения виброустойчивости.

В других случаях, когда автоколебания проявляются недостаточно интенсивно или вообще вырождаются, применение фрез с разнонаклонными зубьями может быть не эффективным или способствовать возбуждению дополнительной неуравновешенности процесса фрезерования. Изучение этого вопроса является важным для разработки рекомендаций по эффективным условиям применения концевых фрез с разнонаклонными зубьями.

Выводы:

1. В статье выполнен анализ конструктивных и геометрических характеристик концевых фрез и влияние этих характеристик на виброустойчивость процесса фрезерования

2. Анализ рекламных проспектов зарубежных фирм-изготовителей режущего инструмента показал, что в рекламных проспектах зарубежных фирм, рекомендующих применение фрез с разнонаклонными зубьями, не указаны скоростные условия их эффективного использования.

3. Правильное назначение скоростного диапазона эксплуатации концевых фрез с разнонаклонными режущими зубьями является важным условием эффективного применения дорогостоящих твердосплавных концевых фрез и требует экспериментального подтверждения.

Список использованных источников: 1. Winston A. Knight Fundamentals of Metal Machining and Maching Tools \ Winston A. Knight, Geoffrey Boothoyd. – Third Edition, 2005. – 608 p. 2. *Крепак А.С.* Влияние угла наклона зубьев концевых фрез на их стойкость / А. С. Крепак // Станки и инструменты.– 1971.– №3.– С.39–42. 3. *Крепак А.С.* Исследование процесса резания жаропрочных сталей концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями: автореф. дис. на соискание начн. степени канд. техн. наук: спец. 05.171 «Теория обработки резанием» / А. С. Крепак – Тула, 1972. – 23 с. 4. *Крепак А. С.* Высокопроизводительные концевые фрезы / А.С. Крепак. // Станки и инструменты.– 1968.– № 7.– 41с 5. Каталог фирмы Guehring – Режим доступа: www.guehring.kiev.ua 6. *Логоминов В.А.* Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. ... канд. техн. наук.: 05.03.01: защищена 21.02.2013: утв. 25.04.2013 / Логоминов Виктор Алексеевич. – Запорожье, 2013. – 226 с. 7. Систематизация колебаний при концевом фрезеровании тонкостенных элементов деталей / С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, Э. В. Кондратиук, В. А. Кришталь, А. Е. Зубарев / Вестник двигателестроения, №1, 2016. - С. 68-71.

Bibliography (transliterated): 1. Winston A. Knight Fundamentals of Metal Machining and Maching Tools \ Winston A. Knight, Geoffrey Boothoyd. – Third Edition, 2005. – 608 p. 2. *Krepak A. S.* Vlianiye ugla naklona zubey kontsevyih frez na ih stoykost / A. S. Krepak // Stanki i instrumentyi.– 1971.– №3.– P.39–42. 3. *Krepak A. S.* Issledovanie protsessa rezaniya zharoprochnyih staley kontsevyimi frezami s raznonaklonnyimi zubymi: avtoref. dis. na soiskanie nachn. stepeni kand. tehn. nauk: spets. 05.171 «Teoriya obrabotki rezaniem» / A. S. Krepak – Tula, 1972. – 23 p. 4. *Krepak A. S.* Vysokoproduktivnyye kontsevyie frezy / A. S. Krepak. // Stanki i instrumentyi.– 1968.– №7.– 41p. 5. Katalog firmy Guehring – Rezhym dostupa: www.guehring.kiev.ua 6. *Logominov V. A.* Formirovaniye sherohovatosti obrabotannoy poverhnosti pri kontsevom tsilindricheskom frezerovanii tonkostennykh elementov detaley: dis. ... kand. tehn. nauk.: 05.03.01: zaschislena 21.02.2013: utv. 25.04.2013 / Logominov Viktor Alekseevich. – Zaporozhe, 2013. – 226 p. 7. Systematyzatsiya kolebaniy pry kontsevom frezerovanii tonkostennykh elementov detalei / S. Y. Diadia, E. B. Kozlova, Э. V. Kondratiuk, V. A. Kryshstal, A. E. Zubarev / Vestnyk dyvhatelestroeniya, №1, 2016. - P.68-71.